

Аэрокосмический научный журнал

Сетевое научное издание
МГТУ им. Н.Э. Баумана
<http://aerospjournal.ru>

Ссылка на статью:

// Аэрокосмический научный журнал.
МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016.
№ 06. С. 26–48.

DOI: [10.7463/aersp.0616.0851777](https://doi.org/10.7463/aersp.0616.0851777)

Представлена в редакцию: 09.10.2016

Исправлена: 23.10.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 533.27:621.499

Анализ влияния состава смесей на основе гелия на коэффициент восстановления температуры и число Прандтля

Кочуров Д. С.^{1,2,*}, Щеголев Н. Л.¹

[*kochurov_ds@yahoo.com](mailto:kochurov_ds@yahoo.com)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Выполнен анализ влияния теплофизических и транспортных свойств газообразных рабочих тел на эффективность устройства газодинамической температурной стратификации (трубы Леонтьева) и замкнутых энергоустановок. Показано, что для замкнутых газотурбинных установок применение бинарных смесей газов на основе гелия с малым значением числа Прандтля Pr вместо чистого гелия приводит к значительному снижению аэродинамической нагрузки на лопаточные машины с сохранением коэффициентов теплоотдачи в теплообменных аппаратах при приемлемом росте гидравлических потерь по тракту турбомашин, а для трубы Леонтьева – к значительному снижению коэффициента восстановления температуры r на стенке, обтекаемой сверхзвуковым потоком, и повышению располагаемого температурного перепада с соответствующим увеличением плотностей тепловых потоков и снижением потребных площадей теплообменных поверхностей. Проведен анализ влияния различных факторов на r и показано, что наиболее перспективными способами его снижения является использование смесей с малыми значениями Pr , организация вдува в пограничный слой сверхзвукового потока через проницаемую стенку или покрытие этой стенки регулярным рельефом. Рассмотрены известные соотношения и методики, доступные в материалах открытой печати, для расчета r в зависимости от Pr , числа Рейнольдса Re_x и числа Маха M и выполнен расчет r в интервале Pr от 0,1 до 1, Re_x от 10^5 до 10^9 и M до 4. Сделан вывод, что практически все представленные соотношения и методики дают удовлетворительное сходство значений r в рассматриваемом интервале Re_x и M с экспериментальными для воздуха при $Pr \approx 0,7$, однако при уменьшении Pr приводят к значительным расхождениям друг относительно друга, при $Pr \approx 0,2$ достигающим 35 – 40 % (для методик, корректно предсказывающих r для воздуха). Рекомендовано проведение экспериментальных исследований по выявлению действительных значений r при обтекании плоской непроницаемой стенки сжимаемым потоком газа для таких смесей как $He-Ar$, $He-Kr$, $He-Xe$, $He-N_2$, $He-CO_2$ при верификации рассмотренных расчетных методик.

Ключевые слова: смеси газов с малым значением числа Прандтля, коэффициент восстановления температуры, устройство газодинамической температурной стратификации (труба Леонтьева), замкнутые газотурбинные установки, транспортные и теплофизические свойства бинарных смесей газов

Введение

Газообразные рабочие тела с малым значением числа Прандтля Pr являются перспективным выбором для использования в устройстве газодинамической температурной стратификации в сверхзвуковом потоке газа [1, 2], известном как труба Леонтьева, и в замкнутых газотурбинных установках (ЗГТУ), инвариантных к источнику тепла и рассчитанных на выработку как десятков киловатт, так и сотен мегаватт [3, 4].

ЗГТУ рассматриваются в качестве перспективного способа преобразования тепловой энергии в механическую и электрическую для приведения в действие ионных двигателей и выработки бортовой электроэнергии в космических ядерных установках при выполнении длительных заданий межпланетного масштаба, для обеспечения электроэнергией стационарных постов на отдаленных планетах и передвижных планетарных исследовательских модулей [3, 5]. Кроме того, инвариантность таких установок к источнику тепла дает возможность использовать реакции сжигания твердых бытовых отходов (ТБО) или газификации угля [6, 7].

При этом для ЗГТУ выбор схемного решения [8, 9] и рабочего тела [3, 4, 10] является одной из наиболее сложных задач при их проектировании. Использование бинарных смесей газов с малым значением Pr [11, 12] по сравнению с чистым гелием (He) позволяет получить достаточно эффективные и малогабаритные турбомашины [13, 14] с сохранением площадей теплообменных аппаратов [3, 4].

Труба Леонтьева представляет собой перспективный теплообменный аппарат для температурной стратификации газового потока с разделением его на холодный и горячий, предлагаемый к использованию в промышленной теплотехнике для создания холодильно-нагревательных установок [15] наряду с нашедшими широкое применение вихревыми аппаратами на эффекте Ранка-Хилша.

Основным достоинством трубы Леонтьева (ТЛ) по сравнению с трубой Ранка-Хилша является то, что «холодный» поток выходит из нее практически без изменения давления. Спектр областей возможного применения трубы Леонтьева совпадает с таковым у вихревых аппаратов [16, 17] и, помимо этого, может позволять комбинировать эти классы устройств [18] или создавать новые схемы энергетических установок [19].

Известно, что наибольшее влияние на величину температурной стратификации и располагаемого температурного перепада в трубе Леонтьева оказывает коэффициент восстановления температуры r [2]. В общем случае r зависит от числа Рейнольдса Re , числа Маха M потока, Pr рабочего тела, наличия вдува через проницаемую стенку в сверхзвуковой поток, особенностей геометрии обтекаемой поверхности, характера турбулентного движения в пограничном слое [2, 20]. Многочисленные экспериментальные исследования на воздухе показали, что для развитого турбулентного режима течения в сверхзвуковом потоке r очень слабо зависит от Re и M , а наиболее перспективным способом понижения r является использование смесей с малым Pr [20], выполнение стенки проницаемой [21] или покрытие ее регулярным рельефом [22].

Обоснование целесообразности использования смесей с малым числом Прандтля в ЗГТУ

Основным требованием к ЗГТУ наземного применения являются большие вырабатываемые мощности, высокий КПД на номинальной мощности и низкая стоимость эксплуатации [23]. Для этих целей в качестве рабочего тела целесообразно применять недорогой гелий (*He*), обладающий наибольшим значением коэффициента теплопроводности λ и наименьшим значением коэффициента динамической вязкости μ из инертных газов и, таким образом, обеспечивающий наибольшие коэффициенты теплоотдачи в теплообменных аппаратах и наименьшие потери полного давления в тракте турбомшины [24].

В то же время *He* обладает наименьшей молекулярной массой m из всех инертных газов, что приводит к максимальной аэродинамической нагрузке на лопаточные аппараты турбомашин и требует значительного увеличения числа ступеней или диаметра турбомашин при одних и тех же параметрах цикла [13]. Для установок наземного базирования большой мощности отсутствуют ограничения по массе, поэтому *He* является идеальным рабочим телом.

ЗГТУ космического применения обладают очень жесткими ограничениями по удельной массе на единицу вырабатываемой мощности, поэтому следует выбирать рабочее тело с транспортными и теплофизическими свойствами не хуже *He* для сохранения размеров теплообменных аппаратов и потерь давления по тракту, но со значительно большей m для максимального уменьшения размеров турбомашин [3]. Известно, что для инертных газов увеличение m ведет к ухудшению как транспортных, так и теплофизических свойств [23]. Было установлено, что применение бинарных смесей *He* со вторым более тяжелым компонентом (криптоном *Kr*, ксеноном *Xe*, азотом N_2) позволяет за счет увеличения m смеси по сравнению с чистым *He* уменьшить на один порядок аэродинамическую нагрузку на лопаточные аппараты турбомашин [3, 25].

При этом бинарные смеси *He* с одним из указанных более тяжелых компонентов обладают лучшими теплофизическими свойствами по сравнению с чистыми газами с такой же m , а также до определенных значений m даже позволяют получить коэффициенты теплоотдачи до 8 % выше, чем у чистого *He* [23, 25]. Однако для указанных смесей рост λ и коэффициентов теплоотдачи сопровождается ухудшением транспортных свойств по сравнению с чистыми газами с такой же m , то есть ростом μ и гидравлических потерь давления в тракте [23, 25].

Известно, что при смешивании легкого газа с тяжелым при любом промежуточном значении m полученной смеси число Прандтля Pr будет иметь меньшее значение, чем для чистых компонентов [5, 11]. Причем для каждой пары компонентов с увеличением m смеси значение Pr будет сначала уменьшаться до некоторого минимума, уникального для данной пары и тем меньшего, чем больше разница m для чистых компонентов, а затем снова увеличиваться до значения Pr для тяжелого компонента. В результате решения робастной задачи было установлено, что для каждой рассмотренной смеси максимальный

выигрыш имеет место при m , соответствующих минимальному значению Pr для данной смеси [3, 25].

Этот факт можно объяснить качественно следующим образом. Число Прандтля Pr является безразмерным критерием подобия тепловых и динамических процессов [26], равным отношению чисел Пекле Pe , характеризующих тепловые процессы в тепловых пограничных слоях на стенках теплообменников и в тракте ЗГТУ, к числам Рейнольдса Re , характеризующим динамические процессы в динамических пограничных слоях по всему тракту:

$$Pr = \frac{Pe}{Re} = \frac{\mu \cdot c_{p \text{ масс}}}{\lambda} = \frac{\mu \cdot c_{p \text{ моль}}}{M \cdot \lambda}. \quad (1)$$

Здесь $c_{p \text{ масс}}$ [Дж/(кг·К)] – истинная изобарная удельная массовая теплоемкость газа, $c_{p \text{ моль}}$ [Дж/(кмоль·К)] – истинная изобарная удельная мольная теплоемкость газа. Таким образом, Pr характеризует соотношение скорости переноса количества движения под действием молекулярных сил вязкости и молекулярной скорости переноса теплоты [27] (динамический и тепловой пограничные слои) только с позиции теплофизических и транспортных свойств рассматриваемого рабочего тела в его текущем термодинамическом и фазовом состоянии и не зависит от особенностей его течения, обтекаемой поверхности, конструкции устройства и т.д.

Выигрыш при использовании смеси в ЗГТУ достигается уменьшением μ с уменьшением гидравлических потерь по тракту, увеличением λ с увеличением коэффициентов теплоотдачи, увеличением m с уменьшением аэродинамической нагрузки на турбомашины, то есть при уменьшении значения Pr . Однако по данным [5, 12] с линейным ростом m смеси λ уменьшается по закону десятичного логарифма от значения для легкого компонента до значения для тяжелого, μ быстро увеличивается до значений тяжелого компонента и затем остается практически постоянной, $c_{p \text{ моль}}$ увеличивается при низких температурах, а при высоких практически остается постоянной.

Из сказанного можно сделать вывод, что однозначного движения в сторону выигрыша при увеличении m нет, и, следовательно, рабочим значением m можно принимать такое, при котором комплекс, учитывающий все приведенные параметры, будет иметь экстремум, то есть когда значение Pr минимально. Причем наиболее перспективной для космических ЗГТУ является смесь $He-Xe$ с $m \approx 40$ г/моль, обладающая наименьшим $Pr \approx 0,21 \dots 0,22$ (в зависимости от температуры T и давления p) из рассмотренных смесей [23] и приводящая к десятикратному уменьшению аэродинамической нагрузки на турбомашины, семикратному увеличению потерь давления в тракте по сравнению с чистым He при сохранении коэффициентов теплоотдачи.

Обоснование целесообразности использования смесей с малым числом Прандтля в устройстве газодинамической стратификации

Труба Леонтьева представляет собой один из способов реализации теплообменного аппарата, осуществляющего безмашинную температурную стратификацию потока газа с

разделением его на холодный и горячий потоки на выходе [15]. Газообразное рабочее тело под давлением подается в общую камеру, из которой один поток направляется во внутренний осесимметричный канал с разгоном до сверхзвуковых скоростей с помощью сопла Лаваля, а второй – во внешний обхватывающий дозвуковой канал, в котором для увеличения длины теплообмена поток может быть пущен по спирали вокруг внутреннего осесимметричного сверхзвукового канала, т.е. два газовых потока разделены стенкой.

Известно, что при рассмотрении задачи обтекания теплоизолированной стенки сжимаемым потоком газа (при числах Маха $M > 0,25$) при числах Прандтля $Pr < 1$ температура торможения потока в пограничном слое у самой стенки $T_{ст}^*$ меньше среднерасходной температуры торможения потока $T_{ср}^*$ в данном нормальном к поверхности стенки сечении [28] (принято, что в ядре потока температура торможения $T^* = T_{ср}^*$).

Этот эффект качественно можно объяснить следующим образом (см. рис. 1). При $Pr < 1$ толщина динамического пограничного слоя δ_d , определяемого профилем продольных скоростей v_x , меньше толщины теплового пограничного слоя δ_t , определяемого профилем статической температуры T [27]. Динамический пограничный слой формируется в потоке у обтекаемой стенки за счет действия вязких сил трения в потоке. При этом v_x в пределах δ_d уменьшается от значения скорости во внешнем ядре потока v_0 (99 % от скорости в ядре потока) на границе пограничного слоя и ядра до 0 на обтекаемой стенке.

Тепловой пограничный слой при обтекании теплоизолированной стенки сжимаемым потоком формируется у стенки потому, что при больших скоростях $M > 0,25$ (и, соответственно, при больших градиентах v_x в динамическом пограничном слое) за счет действия сил трения в пределах динамического пограничного слоя происходит диссипация кинетической энергии, то есть превращение кинетической энергии в теплоту.

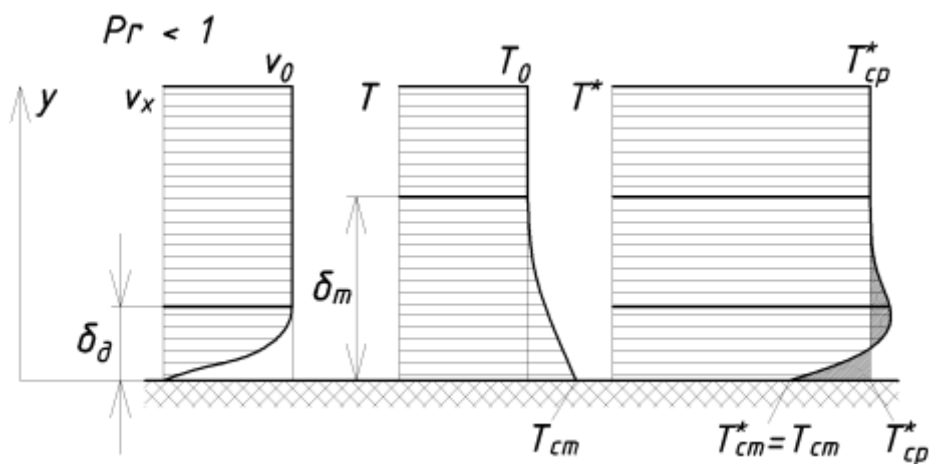


Рис. 1. Профили продольной скорости v_x , статической температуры T , температуры торможения T^* при обтекании плоской теплоизолированной пластины потоком газа при $Pr < 1$ без разгона/торможения

При этом в уравнении энергии диссипативная функция ϵ (слагаемое, учитывающее работу вязких напряжений) отлична от нуля, и пренебрегать ей нельзя. Так как стенка теплоизолированная, то единственным способом отвода выделяющейся в динамическом пограничном слое теплоты (при отсутствии градиента статической температуры и статиче-

ского давления в продольном направлении) является теплопроводность газа в нормальном к стенке направлении (передачей теплоты теплопроводностью в продольном направлении при рассмотрении задачи вынужденной конвекции принято пренебрегать) [26].

Таким образом, в потоке в пределах теплового пограничного слоя формируется характерный профиль статической (реально существующей в потоке) температуры T , уменьшающейся от некоторого значения на стенке $T_{ст}$ до статической температуры в ядре потока на границе ядра и теплового пограничного слоя T_0 .

Уравнение энергии для элементарного объема газа при отсутствии работы внешних сил L_v и внутренних источников тепла q_v [27]

$$\rho \cdot \frac{dh}{dt} = -div(q) + \frac{dp}{dt} + \varepsilon, \quad (2)$$

где ρ [кг/м³] – статическая плотность потока газа, h [Дж/кг] – статическая энтальпия потока газа, t [с] – время, q [Вт/(м²)] – плотность теплового потока за счет механизмов теплопроводности газа, p [Па] – статическое давление в потоке. В случае ламинарного режима и стационарного течения без разгона (торможения) основного потока при допущениях для плоского тонкого динамического и теплового пограничного слоя уравнение (2) преобразуется к виду [27]

$$\rho \cdot v_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + \rho \cdot v_y \cdot \frac{\partial h}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \mu \cdot \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2}, \quad (3)$$

где x [м] – продольная координата до рассматриваемого сечения, отсчитываемая от точки входа потока на пластину (от точки начала формирования пограничного слоя); y [м] – поперечная координата пограничного слоя, отсчитываемая от стенки по нормали к обтекаемой поверхности в данном сечении. В целях качественного анализа будем считать, что поток направлен параллельно стенке ($v_y=0$), μ и λ не зависят от температуры и давления, продольный градиент статической температуры (энтальпии) отсутствует (нет гидравлических потерь и разгона/торможения потока). Тогда уравнение (3) примет вид

$$\lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \mu \cdot \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\lambda}{\rho \cdot c_{p \text{ масс}}} \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} = 0,$$

$$a \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + v \cdot \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} = 0,$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + Pr \cdot \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} = 0, \quad (5)$$

В уравнениях (4, 5) второе слагаемое – диссипативная функция, характеризующая интенсивность превращения кинетической энергии в теплоту в пределах динамического пограничного слоя, то есть это источник теплоты, “размазанный” по толщине δ_d . Вне динамического пограничного слоя градиент v_x отсутствует, поэтому и источник теплоты отсутствует. При принятых допущениях теплота от этого источника при условии теплоизолированной стенки может распространяться только внутрь потока в направлении от стен-

ки и по нормали к ней согласно первому слагаемому (4, 5), характеризующему перенос теплоты механизмом теплопроводности.

С точки зрения транспортных и теплофизических свойств газа чем меньше μ , тем меньше Pr . Тогда согласно (5) при фиксированных значениях первого слагаемого с ростом y будет больше скорость роста v_x (для выполнения равенства должна быть больше вторая производная v_x по y) и, следовательно, тем на меньшем расстоянии от стенки значение v_x увеличится от 0 до значения v_0 . То есть чем меньше μ , тем меньше толщина динамического пограничного слоя, в пределах которого происходит диссипация кинетической энергии с превращением ее в тепловую. Аналогично, чем больше λ , тем меньше Pr . Тогда согласно (5) при фиксированных значениях второй производной v_x по y с ростом y будет меньше скорость падения T и, следовательно, тем на большем расстоянии от стенки значение T уменьшится от $T_{ст}$ до значения T_0 . То есть чем больше λ , тем больше толщина теплового пограничного слоя. Последнее утверждение абсолютно аналогично процессам переноса тепла механизмом теплопроводности в сплошном твердом теле: чем больше λ , тем меньше градиент температуры при одинаковой плотности теплового потока, тем на большее расстояние от источника в пределах тела распространится повышенная температура.

Согласно уравнению Бернулли для сжимаемой жидкости

$$\frac{v_x^2}{2} = \int_T^{T^*} c_{p \text{ масс}}(T) dT, \quad (6)$$

где T^* – температура торможения в данном сечении на расстоянии y по нормали от обтекаемой стенки. Если в целях качественного анализа считать, что истинная изобарная удельная массовая теплоемкость $c_{p \text{ масс}}$ не зависит от температуры и давления, то уравнение (6) упрощается

$$\frac{v_x^2}{2 \cdot c_{p \text{ масс}}} = T^* - T. \quad (7)$$

Эпюра T^* согласно уравнению (6) на основе эпюр v_x и T при $Pr < 1$ показана на рис. 1. В ядре потока при $y > \delta_t$ считается, что T^* равна среднерасходной температуре торможения $T_{ср}^*$, определяемой по (6) с подстановкой T_0 и v_0 . При дальнейшем уменьшении y величина T^* сначала будет увеличиваться, так как в тепловом пограничном слое начинает увеличиваться T , а динамический пограничный слой при $Pr < 1$ начаться еще не успел.

Некоторое увеличение T^* продолжится и после начала динамического пограничного слоя (экстремум T^* будет находиться ниже границы динамического пограничного слоя), так как производная T по y в его начале несколько больше, чем производная v_x по y . Но в рассматриваемой системе отсутствует подвод теплоты и механической работы извне, поэтому согласно закону сохранения энергии полученный избыток T^* должен быть скомпенсирован при дальнейшем уменьшении y до стенки. То есть среднерасходная температура торможения в пределах теплового пограничного слоя должна быть равна $T_{ср}^*$. Это означает, что при дальнейшем уменьшении y после экстремума T^* значение T^* должно стать меньше $T_{ср}^*$, чтобы выделенные на рис. 1 темным площади были равны, что и определит величину температуры торможения потока газа на стенке $T_{ст} = T_{ст}^*$.

Таким образом, при обтекании теплоизолированной стенки сжимаемым потоком газа с $Pr < 1$ разница в толщинах δ_d и δ_t приводит к характерному распределению T^* по толщине теплового пограничного слоя, причем у самой стенки $T_{ст}^* < T_{ср}^*$. Чем меньше Pr , тем больше разница в толщинах δ_d и δ_t , тем ближе к стенке экстремум T^* и тем до меньших значений $T_{ст}^*$ должна уменьшиться T^* , чтобы скомпенсировать свой рост над экстремумом.

С другой стороны, дозвуковой поток газа с таким же Pr течет по внешнему каналу с малыми скоростями и может считаться несжимаемым, тогда описанный эффект распределения T^* в пределах пограничного слоя для внешнего потока либо отсутствует, либо пренебрежимо мал. То есть для внешнего потока температура торможения на теплоизолированной стенке $T_{ст дозв}^* \approx T_{ср}^*$ (так как дозвуковой и сверхзвуковой потоки из одного общего ресивера – см., например, [29] – то их среднерасходные температуры торможения $T_{ср}^*$ до начала теплообмена равны).

Таким образом, между дозвуковым потоком во внешнем канале и тепловым пограничным слоем сверхзвукового потока во внутреннем образуется температурный перепад

$$\Delta T = T_{ср}^* - T_{ст}^*,$$

в результате чего сверхзвуковой поток нагревается, а дозвуковой охлаждается. ΔT тем больше, чем ниже температура торможения сверхзвукового потока у стенки $T_{ст}^*$ в сверхзвуковом канале, то есть чем меньше Pr и чем больше v_0 (M).

Температура торможения сжимаемого потока газа у стенки $T_{ст}^*$ также называется адиабатной температурой стенки [26, 27], эффективной (равновесной) температурой стенки [1], температурой теплоизолированной стенки [2, 20], температурой восстановления на стенке [11]. Эта температура может быть охарактеризована безразмерной величиной, называемой коэффициентом восстановления температуры [26]

$$r = \frac{T_{ст}^* - T_0}{T_{ср}^* - T_0}. \quad (8)$$

Сравнивая (8) и (7) можно прийти к выводу, что r показывает ту долю кинетической энергии невозмущенного потока вне пограничного слоя, которая выделяется в виде тепла в пограничном слое на стенке при $y = 0$ [28]. Чем меньше Pr , тем меньше $T_{ст}^*$ и, следовательно, тем меньше r , тем больше температурный перепад ΔT . Чем больше ΔT , тем больше достижимый уровень температурной стратификации в одной трубе Леонтьева и тем больше плотности тепловых потоков при тех же коэффициентах теплопередачи от потока к потоку через стенку, тем меньшая площадь теплообмена требуется для передачи одной и той же тепловой мощности от потока к потоку на единицу расхода.

Анализ влияния различных факторов на коэффициент восстановления температуры

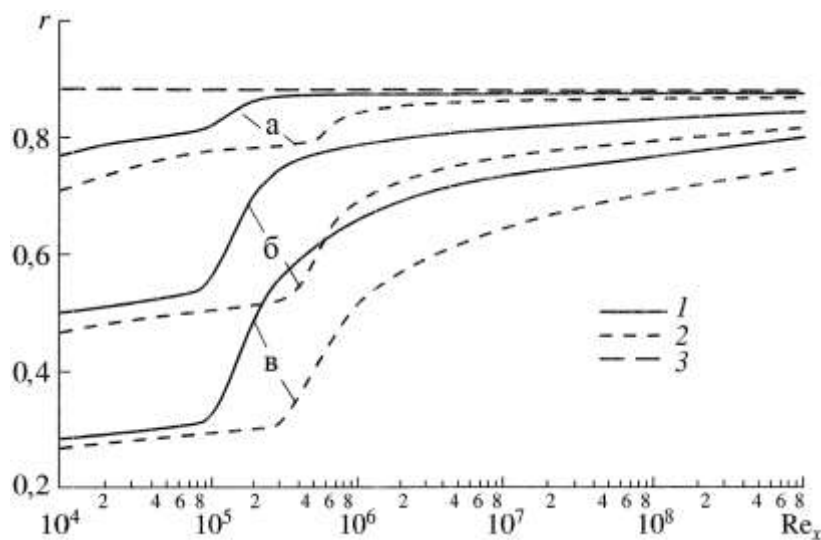
Как показано выше, одним из путей повышения эффективности энергоразделения в трубе Леонтьева является снижение коэффициента восстановления температуры r [1, 2]. В общем случае r зависит от [2, 20, 30]: молекулярного числа Прандтля Pr (свойств рабочего

тела), числа Рейнольдса Re_x (режима течения), турбулентного числа Прандтля Pr_t (характера турбулентного движения в пограничном слое), числа Маха M (степени сжимаемости), интенсивности вдува j (наличия вдува в пограничный слой сжимаемого потока через пронизываемую стенку), особенностей геометрии обтекаемой поверхности (наличия регулярно рельефа в виде полусферических вихреобразующих лунок [22, 31] и т.п.), наличия дисперсных фаз в сжимаемом потоке газа (например, выпадение капель жидкости в виде конденсата [31, 32]) и слабых скачков уплотнения [33].

В результате проведения многочисленных экспериментальных исследований на воздухе $Pr \approx 0,7$ было установлено, что для развитого турбулентного режима течения при $Re_x > 10^7$ и $M > 1$ величина r слабо зависит от Re_x и M и приблизительно равна $r \approx 0,88$ [30].

На рис. 2 приведены результаты численных расчетов [20] значений r в зависимости от Re_x , Pr и M для случая обтекания пластины безградиентным (без торможения/ускорения) потоком газа с постоянной сверхзвуковой скоростью при температуре и давлении торможения 1500 К и 10^5 Па. Для учета переменности Pr_t по толщине пограничного слоя и, таким образом, зависимости r от Pr_t использовалась модель турбулентности, дополненная уравнением переноса для турбулентного потока теплоты.

Из рис. 2 видно, что при любых Pr величина r увеличивается с ростом Re_x и уменьшается с ростом M . Для развитого турбулентного течения при $Re_x > 10^7$ для $Pr = 0,7$ и больше r практически не зависит от Re_x и M . Для того же интервала Re_x с уменьшением Pr от 0,7 до 0,1 зависимость r от Re_x и M усиливается, а само значение r падает.



1 – $M = 1$; 2 – $M = 4$; 3 – эксперимент $r \approx 0,88$ для воздуха при $Pr = 0,7$ и $M > 1$;
а – $Pr = 0,7$; б – $Pr = 0,3$; в – $Pr = 0,1$.

Рис. 2. Расчетная зависимость коэффициента восстановления температуры r от числа Рейнольдса Re_x при разных значениях числа Прандтля Pr и числа Маха M по данным [20]

С увеличением интенсивности вдува $j = (\rho_v \cdot v_v) / (\rho_0 \cdot v_0)$ (где ρ_v и v_v – статическая плотность и скорость вдуваемого газа) в пограничный слой сжимаемого потока газа через пронизываемую стенку величина r уменьшается, и для некоторых значений M на воздухе можно

достичь более чем 30 % снижения по сравнению со случаем без вдува [30]. Причем при увеличении j до определенных значений r перестает зависеть от Pr , а при $Re_x > 10^7$ и от Re_x [20].

Согласно экспериментальным данным, описанным в [22], при обтекании потоком газа при M от 1,7 до 3,5 облученной поверхности значение r падает на 3 – 4 % по сравнению со случаем обтекания гладкой поверхности.

Анализ известных соотношений для расчета коэффициента восстановления температуры в зависимости от числа Прандтля

Известно, что при обтекании плоской непроницаемой пластины сжимаемым потоком воздуха с $Pr \approx 0,7$ для развитого турбулентного режима течения при $Re_x > 10^7$ и $M > 1$ по данным многочисленных экспериментов величина $r \approx 0,88$ [30]. При использовании смесей с меньшими Pr следует ожидать снижения r [2], однако экспериментальные данные по значениям r для таких смесей в широком диапазоне параметров отсутствуют в открытой печати.

Известно большое количество методик и готовых соотношений для расчета r в зависимости от Pr . Например, для случая обтекания плоской непроницаемой стенки при ламинарном режиме течения в пограничном слое для Pr от 0,72 до 1,2 и для чисел Маха набегающего потока M не более 10 [34] (по другим данным [28, 30] для Pr от 0,6 до 2) аппроксимированием результатов аналитического интегрирования уравнения энергии Польгаузеном было получено, что r не зависит от числа Рейнольдса Re_x и M и является только функцией Pr [35]:

$$r = \sqrt{Pr}. \quad (9)$$

Однако, как отмечено в [36], при выводе точного решения уравнения энергии было сделано предположение о постоянстве Pr по толщине пограничного слоя и не дано рекомендаций по нахождению определяющей температуры. При этом, для течения реального газа в аэродинамической трубе, у которого транспортные и теплофизические параметры зависят от температуры, при M от 1 до 5 в пределах пограничного слоя изменение температуры таково, что для воздуха Pr может варьироваться от 0,66 до 0,757 с изменением r от 0,812 до 0,87 [36].

Для случая обтекания плоской непроницаемой стенки при турбулентном режиме течения в пограничном слое при том же допущении постоянства транспортных и теплофизических свойств по толщине пограничного слоя были получены соотношения для расчета r Аккерманом, Себаном, Широковым и Сквайром [36]. Соотношение Аккермана для дозвуковых и сверхзвуковых скоростей [26, 34–36] (по данным [30] для Pr от 0,5 до 2):

$$r = \sqrt[3]{Pr}. \quad (10)$$

Соотношение Себана [36]:

$$r = 1 - (4,71 - 4,11 \cdot B - 0,601 \cdot Pr) \cdot Re^{-0,2}, \quad (11)$$

$$B = Pr/2 \cdot (5 \cdot Pr + 7) / (5 \cdot Pr + 1).$$

Соотношение Широкова, Джонсона и Рубезина [20, 36]:

$$r = 1 - 4,55 \cdot (1 - Pr) \cdot Re^{-0,2}. \quad (12)$$

Соотношение Сквайра [36]:

$$r = Pr^{\frac{(N+1)}{(3 \cdot N+1)}}, \quad (13)$$

где N – величина, обратная степени при безразмерной поперечной координате турбулентного динамического пограничного слоя y/δ_d в выражении для распределения скорости по его толщине $v_x/v_0 = (y/\delta_d)^{1/N}$ (см. рис. 1).

Обычно для профиля скорости в турбулентном динамическом пограничном слое принимается $N = 7$ (распределение одной седьмой [37]). Соотношения (10) – (13) получены при том же допущении о постоянстве Pr и теплофизических и транспортных свойств в пределах пограничного слоя без введения рекомендаций по нахождению определяющей температуры.

Соотношение Такера, Мазлена [35, 36], полученное для непроницаемой стенки на основе расширенного анализа Сквайра:

$$r = Pr^{\frac{N+1+0,528 \cdot M^2}{3 \cdot N+1+M^2}}, \quad (14)$$

где $N = 2,6 \cdot Re^{1/4}$. Соотношение (14) получено при допущении постоянства турбулентного числа Прандтля Pr_t по толщине пограничного слоя и равенства его значению Pr на стенке и учитывает влияние M на r (подробнее см. [35]).

Многопараметрическая зависимость Ротта [36]:

$$r = Pr_t + b \cdot (Pr - Pr_t) \cdot C_f/2 + (7 - Pr_t) \cdot \sqrt{C_f/2},$$

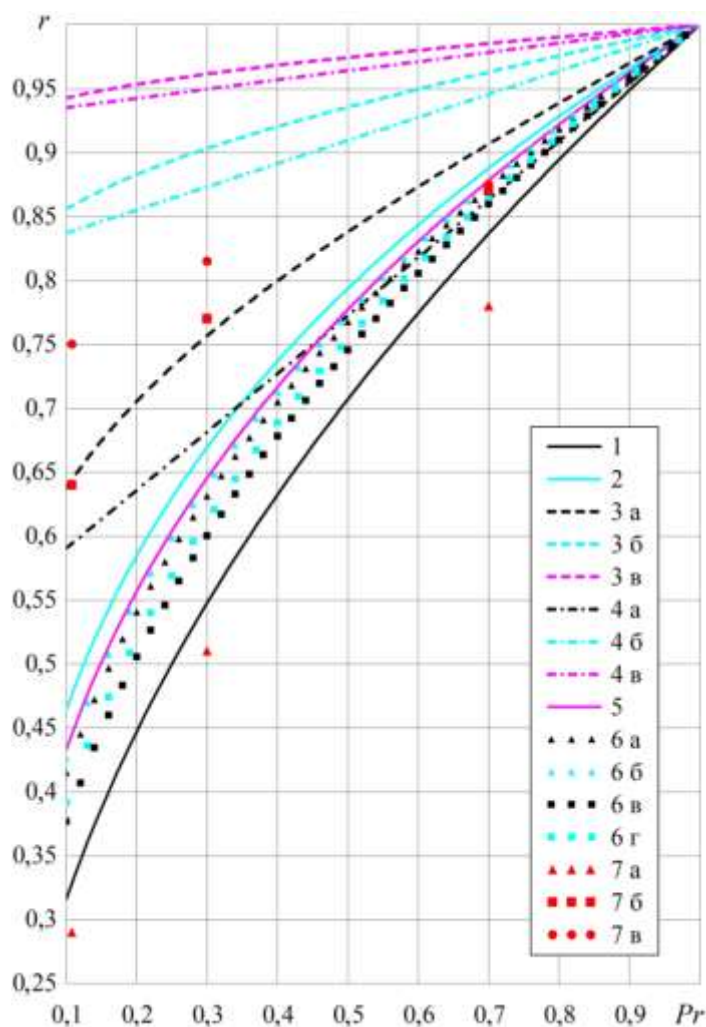
где Pr_t – число Прандтля турбулентное, используемое в модели турбулентности, C_f – местный коэффициент вязкого поверхностного трения; b – функция от отношения Pr / Pr_t , характеризующая процессы в ламинарном подслое [37].

Известна также методика расчета течения и теплообмена в сжимаемом турбулентном пограничном слое, основанная на численном решении уравнений неразрывности, движения и энергии с использованием трехпараметрической модели турбулентности и уравнения переноса для турбулентного потока тепла [20]. Методика учитывает переменность теплофизических и транспортных свойств газа и молекулярного числа Прандтля Pr по толщине пограничного слоя и их зависимость от температуры и давления, а также непостоянство турбулентного числа Прандтля Pr_t по толщине пограничного слоя.

На рис. 3 приведены результаты расчетов зависимостей r от Pr при разных Re_x и M , проведенных по соотношениям (9) – (14), а также дискретные результаты численного расчета безградиентного потока, обтекающего плоскую непроницаемую стенку, взятые из [20]. Качественно все рассмотренные методики дают похожие зависимости.

С уменьшением Pr значение r монотонно уменьшается от 1 при $Pr = 1$, когда толщина динамического пограничного слоя равна толщине теплового и, согласно анализу, проведенному выше (см. рис. 1), отсутствует характерное распределение температуры торможения T^* по толщине пограничного слоя. С увеличением Re_x значение r при тех же значениях Pr и M увеличивается (для соотношений (9) и (10) увеличение Re_x эквивалентно переходу от ламинарного течения к турбулентному), а с увеличением M согласно результатам, полученным по (14), а также результатам, приведенным на рис. 2 и взятым из [20], уменьшается.

Использованные методики расчета r дают отличные друг от друга результаты (см. рис. 3). При этом хорошую сходимость с экспериментальными результатами, полученными на воздухе [30] ($Pr \approx 0,7$, $r \approx 0,88$) для развитого турбулентного сверхзвукового течения при $Re_x \geq 10^7$ и $M > 1$, показывают соотношения Аккермана (10), Сквайра (13) и Такера-Мазлена (14), а также методика [20].



1 – соотношение (9); 2 – соотношение (10); 3 – соотношение (11), а – $Re_x = 10^5$, б – $Re_x = 10^7$, в – $Re_x = 10^9$; 4 – соотношение (12), а – $Re_x = 10^5$, б – $Re_x = 10^7$, в – $Re_x = 10^9$; 5 – соотношение (13) при $N = 7$; 6 – соотношение (14), а – $M = 2$, $Re_x = 10^7$, б – $M = 2$, $Re_x = 10^9$, в – $M = 4$, $Re_x = 10^7$, г – $M = 4$, $Re_x = 10^9$; 7 – результаты расчета [20] при $M = 4$, а – $Re_x = 10^5$, б – $Re_x = 10^7$, в – $Re_x = 10^9$

Рис. 3. Расчетные зависимости коэффициента восстановления температуры r от молекулярного числа Прандтля Pr при различных числах Рейнольдса Re_x и Маха M

Соотношения (10, 13, 14) при уменьшении Pr при тех же Re_x и M дают очень похожие друг на друга результаты, и при $Pr \approx 0,2$ ($He-Xe$ смесь с молекулярной массой $m = 40 \dots 50$ г/моль) значение r изменяется в достаточно узких пределах от 0,5 до 0,58, в то время как методика [20] при снижении Pr приводит к значительно большим значениям r (на 35 – 40 % при $Pr \approx 0,2$) и более сильной зависимости r от Re_x .

Соотношения Себана (11) и Широкова, Джонсона и Рубезина (12) для $Re_x \geq 10^7$ при всех значениях Pr дают результаты, очень сильно превышающие результаты (10, 13, 14) и [20], и, кроме того, не соответствуют экспериментальным данным для воздуха при $Pr \approx 0,7$.

Для ламинарного режима течения при $Re_x = 10^5$ методика [20] при $Pr \leq 0,7$ и соотношение Широкова, Джонсона, Рубезина (12) при Pr в окрестности 0,7 приводят к значениям r , близким к результатам, полученным по соотношению (9), верифицированному экспериментально на воздухе при $Pr \approx 0,7$.

По результатам проведенного анализа известных методик расчета зависимостей r от Pr при разных Re_x и M с учетом полученных значительных различий в расчетных значениях при малых Pr можно рекомендовать проведение экспериментальных исследований по выявлению действительных значений r при обтекании плоской непроницаемой стенки сжимаемым потоком газа при различных Re_x и M для таких смесей как $He-Ar$ ($m = 15 \dots 20$ г/моль, $Pr = 0,4 \dots 0,42$), $He-Kr$ ($m = 30 \dots 40$ г/моль, $Pr = 0,28 \dots 0,31$), $He-Xe$ ($m = 40 \dots 60$ г/моль, $Pr = 0,2 \dots 0,23$) [5, 11], $He-N_2$ ($m = 10 \dots 15$ г/моль, $Pr = 0,48 \dots 0,52$) [11, 25], $He-CO_2$ ($m = 15 \dots 20$ г/моль, $Pr = 0,4 \dots 0,42$) [11, 38] для верификации рассмотренных расчетных методик.

При обработке экспериментальных данных расчет теплофизических и транспортных свойств и Pr для смесей в зависимости от температуры и давления можно рекомендовать проводить по методике [39] для смесей $He-Ar$, $He-Kr$, $He-Xe$ с указанными выше молекулярными массами m при давлениях до 2 МПа и температурах от 300 К до 1200 К. Для смесей $He-Ar$, $He-Kr$, $He-Xe$, $He-N_2$ при температурах от 300 К до 1400 К и давлениях от 0,1 до 2 МПа расчет теплофизических и транспортных свойств и Pr рекомендуется проводить по методике [5, 25]. Для оценки свойств смеси $He-CO_2$ при давлениях и температурах, не сильно отличающихся от 0,1 МПа и 300 К, можно воспользоваться методикой [39] или расчетными результатами [11, 38].

Заключение

Бинарные смеси газов на основе гелия He с малым значением числа Прандтля Pr являются перспективными рабочими телами для замкнутых газотурбинных установок космического назначения и устройства газодинамической стратификации (трубы Леонтьева). Для ЗГТУ малое значение Pr обеспечивает наиболее благоприятное сочетание массовых, транспортных и теплофизических свойств смеси, приводящее к значительному снижению аэродинамической нагрузки на лопаточные машины по сравнению с чистым He за счет большей молекулярной массы m , сохранению коэффициентов теплоотдачи в теплообмен-

ных аппаратах при некотором падении коэффициента теплопроводности λ и приемлемый рост гидравлических потерь по тракту турбомашин из-за возрастания коэффициента динамической вязкости μ . Для трубы Леонтьева использование газообразных рабочих тел с малым значением Pr за счет значительной разницы в толщинах теплового и динамического пограничного слоев и возникающего из-за этого характерного распределения температуры торможения потока в пограничном слое приводит к снижению коэффициента восстановления температуры r на стенке, омываемой внутренним сверхзвуковым сжимаемым потоком газа, снижению температуры теплоизолированной стенки и, соответственно, к увеличению располагаемого температурного перепада с увеличением плотностей тепловых потоков и снижением потребных площадей теплообмена для срабатывания одной и той же тепловой мощности с единицы расхода.

При любых Pr величина r увеличивается с ростом числа Рейнольдса Re_x и уменьшается с ростом числа Маха M . Для развитого турбулентного течения при $Re_x > 10^7$ для $Pr \geq 0,7$ величина r практически не зависит от Re_x и M . Для того же интервала Re_x с уменьшением Pr от 0,7 до 0,1 зависимость r от Re_x и M усиливается, а само значение r падает. С увеличением интенсивности вдува j в пограничный слой сжимаемого потока газа через проницаемую стенку величина r уменьшается, и для некоторых значений M на воздухе можно достичь более чем 30 % снижения по сравнению со случаем без вдува. При обтекании потоком газа при M от 1,7 до 3,5 облученной поверхности значение r падает на 3 – 4 % по сравнению со случаем обтекания гладкой поверхности. Наиболее перспективными способами снижения r является использование смесей с малыми значениями Pr , организация вдува в пограничный слой сверхзвукового потока через проницаемую стенку или покрытие этой стенки регулярным рельефом.

Выполнен анализ известных соотношений и методик, доступных в открытой печати, расчета r в зависимости от Pr , Re_x и M на непроницаемой плоской стенке. В их число вошли: для ламинарного потока соотношение Польгаузена одной второй; для турбулентного потока соотношения Аккермана, Себана, Широкова-Джонсона-Рубезина, Сквайра, Такера-Мазлена, Ротта; универсальная методика численного расчета, основанная на решении уравнений неразрывности, количества движения и энергии с использованием трехпараметрической модели турбулентности и соотношения турбулентного переноса теплоты с учетом переменности транспортных и теплофизических свойств газа и турбулентного числа Прандтля по толщине пограничного слоя. По приведенным соотношениям выполнен расчет r в интервале Pr от 0,1 до 1, Re_x от 10^5 до 10^9 и M до 4. Качественно все рассмотренные методики дают похожие зависимости, хорошо согласующиеся с вышеприведенными выводами о зависимости r от Pr , Re_x и M . Практически все представленные соотношения и методики для воздуха при $Pr \approx 0,7$ дают удовлетворительное сходство значений r в рассматриваемом интервале Re_x и M с экспериментальными. Однако при уменьшении Pr получаемые расчетные результаты значительно отличаются друг от друга. Так, при $Pr \approx 0,2$ расхождения для методик, корректно предсказывающих r для воздуха, достигают 35 – 40 %. На основе полученных результатов, а также с учетом отсутствия эксперимен-

тальных данных по r в открытой печати для малых Pr рекомендовано проведение экспериментальных исследований по выявлению действительных значений r при обтекании плоской непроницаемой стенки сжимаемым потоком газа для таких смесей как $He-Ar$, $He-Kr$, $He-Xe$, $He-N_2$, $He-CO_2$ для верификации рассмотренных расчетных методик.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00699).

Список литературы

1. Леонтьев А.И. Газодинамический метод энергоразделения газовых потоков // Теплофизика высоких температур. 1997. Т. 35, № 1. С. 157-159.
2. Леонтьев А.И. Газодинамические методы температурной стратификации (обзор) // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2002. № 4. С. 6 – 26.
3. El-Genk M.S., Tournier J-M.P. Noble-Gas Binary Mixtures for Closed-Brayton-Cycle Space Reactor Power Systems // Journal of Propulsion and Power. 2007. Vol. 23. No. 4. Pp. 863-873. DOI: [10.2514/1.27664](https://doi.org/10.2514/1.27664)
4. Tournier J.-M.P., El-Genk M.S. Noble gas binary mixtures for gas-cooled reactor power plants // Nuclear Engineering and Design. 2008. Vol. 238. Iss. 6. Pp. 1353 – 1372. DOI: [10.1016/j.nucengdes.2007.10.021](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2007.10.021)
5. Tournier J-M.P., El-Genk M.S. Properties of noble gases and binary mixtures for closed Brayton Cycle applications // Energy Conversion and Management. 2008. Vol. 49. Iss. 3. P. 469-492. DOI: [10.1016/j.enconman.2007.06.050](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.06.050)
6. Ahn Y., Bae S.J., Kim M., Cho S.K., Baik S., Lee J.I., Cha J.E. Review of supercritical CO₂ power cycle technology and current status of research and development // Nuclear Engineering and Technology. 2015. Vol. 47. Iss. 6. Pp. 647 – 661. DOI: [10.1016/j.net.2015.06.009](https://doi.org/10.1016/j.net.2015.06.009)
7. Recompression Closed Brayton Cycle / U.S. Dep. of Energy. Sandia National Laboratories. Режим доступа: http://energy.sandia.gov/wp-content/gallery/uploads/ARPAE_Brayton_SAND20140672.pdf (дата обращения 07.11.2016).
8. Арбеков А.Н., Бурцев С.А. Исследование цикла замкнутой газотурбинной тригенерационной установки последовательной схемы // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 3. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/359008.html> (дата обращения 07.11.2016).
9. Арбеков А.Н., Бурцев С.А. Исследование цикла замкнутой газотурбинной тригенерационной установки параллельной схемы // Тепловые процессы в технике. 2012. Т. 4. № 7. С. 326-331.
10. Арбеков А.Н. Выбор рабочего тела для замкнутых газотурбинных установок мощностью от 6 до 12 кВт, работающих на органическом топливе // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. № 1. С. 131-135. DOI: [10.7868/S0040364414010013](https://doi.org/10.7868/S0040364414010013)

11. Бурцев С.А., Кочуров Д.С., Щеголев Н.Л. Исследование влияния доли гелия на значение критерия Прандтля газовых смесей // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 5. С. 314-329. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/710811.html> (дата обращения 07.11.2016). DOI: [10.7463/0514.0710811](https://doi.org/10.7463/0514.0710811)
12. Бурцев С.А., Кочуров Д.С., Щеголев Н.Л. Исследование влияния состава бинарных смесей инертных газов на их теплофизические свойства // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 11. С. 217-237. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/822897.html> (дата обращения 07.11.2016). DOI: [10.7463/1115.0822897](https://doi.org/10.7463/1115.0822897)
13. Tournier J-M.P., El-Genk M.S. Alternative working fluids to reduce size of turbomachinery for VHTR plants // Intern. Congress on Advances in Nuclear Power Plants. ICAPP'08 (Anaheim, CA, USA, June 8-12, 2008): Proceedings. Red Hook, 2008. Vol. 1. Pp. 351 – 360.
14. Арбеков А.Н., Новицкий Б.Б. Экспериментальное исследование характеристик ступени малоразмерного центробежного компрессора // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 8. С. 29. DOI: [10.7463/0812.0432308](https://doi.org/10.7463/0812.0432308)
15. Леонтьев А.И. Способ температурной стратификации газа и устройство для его осуществления (труба Леонтьева): пат. 2106581 Российская Федерация. 1998. Бюл. № 7. 5 с.
16. Научные основы технологий XXI века / Под общ. ред. А.И. Леонтьева и др. М.: Энергомаш, 2000. 136 с.
17. Пиралишвили Ш.А., Поляев В.М., Сергеев М.Н. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения. М.: Энергомаш, 2000. 414 с.
18. Леонтьев А.И., Бурцев С.А. Устройство вихревого газодинамического энергоразделения // Доклады Академии наук. 2015. Т. 464. № 6. С. 679 – 681. DOI: [10.7868/S0869565215300106](https://doi.org/10.7868/S0869565215300106)
19. Щеголев Н.Л., Стерелюхин С.А. Схема и цикл замкнутой ГТУ с охлаждаемым сверхзвуковым диффузором и соплом-нагревателем // XII школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (Москва, 25-28 мая 1999 г.): Труды. М., 1999. С. 121-124.
20. Леонтьев А.И., Лущик В.Г., Якубенко А.Е. Коэффициент восстановления в сверхзвуковом потоке газа с малым числом Прандтля // Теплофизика высоких температур. 2006. Т. 44. № 2. С. 238 – 245.
21. Здитовец А.Г., Виноградов Ю.А., Стронгин М.М., Титов А.А., Медвецкая Н.В. Экспериментальное исследование особенностей теплообмена при вдуве гелия через проницаемую поверхность в сверхзвуковой поток аргона // Тепловые процессы в технике. 2012. № 6. С. 253-260.
22. Leontiev A.I., Vinogradov Yu.A., Bednov S.M., Golikov A.N., Yermolaev I.K., Dilevskaya E.V., Strongin M.M. Effect of vortex flows at surface with hollow-type relief on

heat transfer coefficients and equilibrium temperature in supersonic flow // Experimental Thermal and Fluid Science. 2002. Vol. 26. Iss. 5. Pp. 487–497. DOI: [10.1016/S0894-1777\(02\)00157-7](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(02)00157-7)

23. El-Genk M.S., Tournier J-M.P. Selection of noble gas binary mixtures for Brayton space nuclear power systems // 4th Intern. Energy Conversion Engineering Conf. and Exhibit. IECEC (San Diego, CA, June 26-29, 2006): AIAA Meeting Papers. San Diego, 2006, pp. 4168-4176. DOI: [10.2514/6.2006-4168](https://doi.org/10.2514/6.2006-4168)
24. El-Genk M.S., Tournier J-M.P. On the use of noble gases and binary mixtures as reactor coolants and CBC working fluids // Energy Conversion and Management. 2008. Vol. 49. Iss. 7. Pp. 1882 – 1891. DOI: [10.1016/j.enconman.2007.08.017](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.08.017)
25. Tournier J-M.P., El-Genk M.S. Transport properties of He-N₂ binary gas mixtures for CBC space applications // Space Technology and Applications International Forum - STAIF 2008. Melville: AIP, 2008, pp. 637 – 647. DOI: [10.1063/1.2845025](https://doi.org/10.1063/1.2845025)
26. Теория тепломассообмена / Под ред. А.И. Леонтьева. 2-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. 683 с.
27. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд. М.: Издательство МЭИ, 2005. 548 с.
28. Бурцев С.А., Леонтьев А.И. Исследование влияния диссипативных эффектов на температурную стратификацию в потоках газа (обзор) // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. № 2. С. 310 – 322. DOI: [10.7868/S0040364413060069](https://doi.org/10.7868/S0040364413060069)
29. Леонтьев А.И., Щеголев Н.Л., Носатов В.В., Стерелюхин С.А. Новый газодинамический метод температурной стратификации газа // X Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели». 150 лет Н.Е. Жуковского (Москва, 19-21 ноября 1996 г.): Тезисы докл. М.: ГПНТБ, 1996. С. 76-77.
30. Бурцев С.А. Анализ влияния различных факторов на значение коэффициента восстановления температуры на поверхности тел при обтекании потоком воздуха (обзор) // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2004. № 11. С. 1-28. DOI: [10.7463/1104.0551021](https://doi.org/10.7463/1104.0551021)
31. Бурцев С.А. Исследование путей повышения эффективности газодинамического энерго-разделения // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. № 1. С. 14 – 21. DOI: [10.7868/S0040364414010062](https://doi.org/10.7868/S0040364414010062)
32. Бурцев С.А., Карпенко А.П., Леонтьев А.И. Метод распределенного получения сжиженного природного газа на газораспределительных станциях // Теплофизика высоких температур, 2016. Т. 54. № 4. С. 605-608. DOI: [10.7868/S0040364416030042](https://doi.org/10.7868/S0040364416030042)
33. Попович С.С. Экспериментальное исследование влияния ударных волн на эффект безмашинного энергоразделения газовых потоков // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн., 2016. № 3. С. 64-80. DOI: [10.7463/0316.0835444](https://doi.org/10.7463/0316.0835444)

34. Wimbrow W.R. Experimental investigation of temperature recovery factors on bodies of revolution at supersonic speeds // NACA Technical Note 1975. Wash., 1949. 19 p.
35. Tucker M., Maslen S.H. Turbulent boundary-layer temperature recovery factors in two-dimensional supersonic flow // NACA Technical Note 2296. Wash., 1951. 21 p.
36. Gruenewald K.H. Temperature recovery factors in the transitional and turbulent boundary layer on a 40-degree cone cylinder at Mach number 2.9 / U.S. Naval Ordnance Laboratory. White Oak (MD), 1953. 64 p.
37. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1985. 320 с.
38. Diaz G., Campo A. Artificial neural networks to correlate in-tube turbulent forced convection of binary gas mixtures // Intern. J. of Thermal Sciences. 2009. Vol. 48. Iss. 7. Pp. 1392-1397. DOI: [10.1016/j.ijthermalsci.2008.12.001](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.12.001)
39. Кочуров Д.С. Исследование транспортных и теплофизических свойств бинарных смесей инертных газов с использованием автоматизированной системы расчета Tetra // Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 5. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/708327.html> (дата обращения 07.11.2016).

Investigating the Influence of Helium Based Mixtures Composition on the Temperature Recovery Factor and Prandtl Number Values

D.S. Kochurov^{1,2,*}, N.L. Schegolev¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

²Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia

Keywords: low Prandtl number gas mixtures, temperature recovery factor, gas dynamic temperature stratification device (Leontiev's tube), closed Brayton cycle gas turbine power plants, transport and thermo-physical properties of binary gas mixtures

The paper studies the influence of thermo-physical and transport properties of gaseous working fluids on the efficiency of closed Brayton cycle gas turbine power plants and gas dynamic temperature stratification device (Leontiev's tube). It is shown that using helium binary gas mixtures with low Prandtl number Pr values as working fluids instead of pure helium in closed Brayton cycle gas turbine power plants leads to significant drop in the turbo-machinery aerodynamic loading with retention of the heat transfer coefficients in heat-exchangers and with sustainable growth in the pressure losses along the power plant loop components. For the Leontiev's tube, using the helium binary gas mixtures with low Pr values results in significant drop of the temperature recovery factor r value on the wall in supersonic flow and in rise of the available temperature difference with appropriate increase of heat flow densities and decrease of required heat transfer areas value. The paper analyses the influence of different factors on the value r . Shows that using the gas mixtures with low Pr values as working fluids, injecting gas into supersonic flow boundary layer through permeable wall and arranging regular relief on the wall surface are the most promising solutions for decreasing the value r . Examines the methodologies and correlations known from available open sources to calculate the r values depending on Pr , Reynolds number Re_x and Mach number M and presents the calculation results obtained through these correlations for Pr 0,1...1, Re_x 10^5 ... 10^9 and M up to 4. Practically, all the methodologies and correlations examined are in good agreement with experimental data obtained for air with $Pr \approx 0,7$ over the intervals of Re_x and M considered. However, with further reduction of Pr value the calculation results for r diverge for different methodologies and correlations with up to 35 – 40 % difference for $Pr \approx 0,2$ for those which are in good agreement with the air experimental data. Thus, there is a recommendation to conduct further experimental investigations to obtain real r values for different Pr , Re_x and M on the flat impermeable wall in supersonic flow

for the *He-Ar*, *He-Kr*, *He-Xe*, *He-N₂*, *He-CO₂* binary gas mixtures in order to verify the methodologies and correlations examined.

References

1. Leontiev A.I. Gas-dynamic method of energy separation of gas flows. *Teplofizika vysokikh temperatur = High Temperature*, 1997, vol. 35, iss. 1, pp. 155-157.
2. Leontiev A.I. Gas-Dynamic Methods of Temperature Stratification (a Review). *Izvestiia RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza = Fluid Dynamics*, 2002, vol. 37, iss. 4, pp. 512 – 529. DOI: [10.1023/A:1020629000437](https://doi.org/10.1023/A:1020629000437)
3. El-Genk M.S., Tournier J-M.P. Noble-Gas Binary Mixtures for Closed-Brayton-Cycle Space Reactor Power Systems. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, vol. 23, no. 4, pp. 863-873. DOI: [10.2514/1.27664](https://doi.org/10.2514/1.27664)
4. Tournier J-M.P., El-Genk M.S. Noble gas binary mixtures for gas-cooled reactor power plants. *Nuclear Engineering and Design*, 2008, vol. 238, iss. 6, pp. 1353 – 1372. DOI: [10.1016/j.nucengdes.2007.10.021](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2007.10.021)
5. Tournier J-M.P., El-Genk M.S. Properties of noble gases and binary mixtures for closed Brayton Cycle applications. *Energy Conversion and Management*, 2008, vol. 49, iss. 3, pp. 469-492. DOI: [10.1016/j.enconman.2007.06.050](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.06.050)
6. Ahn Y., Bae S.J., Kim M., Cho S.K., Baik S., Lee J.I., Cha J.E. Review of supercritical CO₂ power cycle technology and current status of research and development. *Nuclear Engineering and Technology*, 2015, vol. 47, iss. 6, pp. 647 – 661. DOI: [10.1016/j.net.2015.06.009](https://doi.org/10.1016/j.net.2015.06.009)
7. Recompression Closed Brayton Cycle / U.S. Dep. of Energy. Sandia National Laboratories. Режим доступа: http://energy.sandia.gov/wp-content/gallery/uploads/ARPAE_Brayton_SAND20140672.pdf, accessed 07.11.2016.
8. Arbekov A.N., Burtsev S.A. Research of the working cycle of a closed gas turbine in a tri-generation unit operating on a sequential scheme. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no. 3. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/359008.html>, accessed 07.11.2016.
9. Arbekov A.N., Burtsev S.A. Research of Closed Gas Turbine Cycle of a Trigenation Unit Operating on Parallel Schema. *Teplovye protsessy v tekhnike = Thermal Processes in Engineering*, 2012, vol. 4, no. 7, pp. 326-331.
10. Arbekov A.N. Selection of the working medium for 6- to 12- kW closed organic-fuel-powered gas-turbine plants. *Teplofizika vysokikh temperatur = High Temperature*, 2014, vol. 52, no. 1, pp. 121-125. DOI: [10.1134/S0018151X14010015](https://doi.org/10.1134/S0018151X14010015)
11. Burtsev S.A., Kochurov D.S., Schegolev N.L. Investigation of the helium proportion influence on the Prandtl number value of gas mixtures. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 5, pp. 314-329. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/710811.html>, accessed 07.11.2016. DOI: [10.7463/0514.0710811](https://doi.org/10.7463/0514.0710811)

12. Burtsev S.A., Kochurov D.S., Schegolev N.L. Investigating the effect of the binary mixtures composition of noble gases on their thermodynamic and transport properties. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2015, no. 11, pp. 217-237. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/822897.html>, accessed 07.11.2016. DOI: [10.7463/1115.0822897](https://doi.org/10.7463/1115.0822897)
13. Tournier J-M.P., El-Genk M.S. Alternative working fluids to reduce size of turbomachinery for VHTR plants. *International Congress on Advances in Nuclear Power Plants. ICAPP'08* (Anaheim, CA, USA, June 8-12, 2008): Proceedings. Red Hook, 2008. Vol. 1. Pp. 351 – 360.
14. Arbekov A.N., Novitskij B.B. Experimental study of the characteristics of the small-scale centrifugal-flow compressor. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no. 8, pp. 491-504. DOI: [10.7463/0812.0432308](https://doi.org/10.7463/0812.0432308)
15. Leontiev A.I. *Sposob temperaturnoj stratifikatsii gaza i ustrojstvo dlia ego osuschestvleniia (truba Leont'eva)* [The method of temperature stratification of gas and device for its implementation (Pipe Leontiev)]. Patent RF, no. 2106581. 1998. (in Russ.).
16. *Nauchnye osnovy tekhnologii XXI veka* [Scientific basis of technologies in XXI century] / Ed. by A.I. Leontiev a.o. Moscow: Energomash Publ., 2000. 136 p. (in Russ.).
17. Piralishvili Sh.A., Poliaev V.M., Sergeev M.N. *Vihrevoj effekt. Eksperiment, teoriia, tekhnicheskie resheniia* [Vortex effect. Experiment, theory, technical solutions]. Moscow: Energomash Publ., 2000. 412 p. (in Russ.).
18. Leontiev A.I., Burtsev S.A. Device for separation of vortex gas-dynamic energy. *Doklady Akademii nauk = Doklady Physics*, 2015, vol. 60, iss. 10, pp. 476–478. DOI: [10.1134/S1028335815100092](https://doi.org/10.1134/S1028335815100092)
19. Schegolev N.L., Sterelyukhin S.A. Skhema i tsikl zamknutoj GTU s okhlazhdaemym sverkhzvukovym diffuzorom i soplom-nagrevatelem [Schematic diagram and cycle of a closed Brayton cycle gas turbine unit with cooled supersonic diffuser and heating nozzle]. *XII shkola-seminaa molodykh uchenykh i spetsialistov pod rukovodstvom akad. RAN A.I. Leont'eva «Problemy gazodinamiki i teplomassoobmena v energeticheskikh ustanovkakh»*: Trudy [12th School-seminar of the young scientists and specialists under the leadership of the acad. A.I. Leontiev «Problems of Gas Dynamics and Heat Transfer in Power Machinery»]: Proceedings. Moscow, 1999, pp. 121-124 (in Russ.).
20. Leontiev A.I., Lushchik V.G., Yakubenko A.E. The recovery factor in a supersonic flow of gas with a low Prandtl number. *Teplofizika vysokikh temperatur = High Temperature*, 2006, vol. 44, iss. 2, pp. 234-242. DOI: [10.1007/s10740-006-0029-8](https://doi.org/10.1007/s10740-006-0029-8)
21. Zditovets A.G., Vinogradov Yu.A., Strongin M.M., Titov A.A., Medvetskaya N.V. Experimental study of heat transfer features at helium injection through a permeable surface in supersonic argon flow. *Teplovye protsessy v tekhnike = Thermal Processes in Engineering*, 2012, no. 6, pp. 253-261.
22. Leontiev A.I., Vinogradov Yu.A., Bednov S.M., Golikov A.N., Yermolaev I.K., Dilevskaya E.V., Strongin M.M. Effect of vortex flows at surface with hollow-type relief on

heat transfer coefficients and equilibrium temperature in supersonic flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2002, vol. 26, iss. 5, pp. 487–497.

DOI: [10.1016/S0894-1777\(02\)00157-7](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(02)00157-7)

23. El-Genk M.S., Tournier J-M.P. Selection of noble gas binary mixtures for Brayton space nuclear power systems. *4th Intern. Energy Conversion Engineering Conf. and Exhibit. IECEC* (San Diego, CA, 26-29 June 2006): AIAA Meeting Papers. 2006. P. 4168-4176. DOI: [10.2514/6.2006-4168](https://doi.org/10.2514/6.2006-4168)
24. El-Genk M.S., Tournier J-M.P. On the use of noble gases and binary mixtures as reactor coolants and CBC working fluids. *Energy Conversion and Management*, 2008, vol. 49, iss. 7, pp. 1882 – 1891. DOI: [10.1016/j.enconman.2007.08.017](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.08.017)
25. Tournier J-M.P., El-Genk M.S. Transport properties of He-N₂ binary gas mixtures for CBC space applications. *Space Technology and Applications International Forum - STAIF 2008*. Melville: AIP, 2008, pp. 637 – 647. DOI: [10.1063/1.2845025](https://doi.org/10.1063/1.2845025)
26. *Teoriia teplomassoobmena* [Heat and mass transfer theory] / Ed. by A.I. Leontiev. Moscow: Bauman MSTU Publ., 1997. 683 p. (in Russ.).
27. Tsvetkov F.F., Grigorjev B.A. *Teplomassoobmen* [Heat and mass transfer]. 2nd ed. Moscow: MEI Publ., 2005. 548 p. (in Russ.).
28. Burtsev S.A., Leontiev A.I. Study of the influence of dissipative effects on the temperature stratification in gas flows (Review). *Teplofizika vysokikh temperatur = High Temperature*, 2014, vol. 52, iss. 2, pp. 297-307. DOI: [10.1134/S0018151X13060060](https://doi.org/10.1134/S0018151X13060060)
29. Leontiev A.I., Schegolev N.L., Nosatov V.V., Sterelyuhin S.A. Novyj gazodinamicheskij metod temperaturnoj stratifikatsii gaza [A new gas dynamic method of temperature stratification of gases]. *X Vserossijskaia mezhvuzovskaia nauchno-tekhnicheskaia konferentsiia «Gazoturbinnye i kombinirovannye ustanovki i dvigateli»*: Tezisy dokladov [10th All-Russia Institute Science Technology Conference “Gas Turbine and Combined Apparatus and Engines”]: Abstracts. Moscow: GPNTB, 1996, pp. 76 – 77. (in Russ.).
30. Burtsev S.A. Analysis of influence of different factors on the value of the temperature recovery factor at object surfaces in case of an airflow (Review). *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2004, no. 11, pp. 1-28. DOI: [10.7463/1104.0551021](https://doi.org/10.7463/1104.0551021)
31. Burtsev S.A. Exploring ways to improve efficiency of gas dynamic energy separation. *Teplofizika vysokikh temperatur = High Temperature*, 2014, vol. 52, iss. 1, pp. 12-18. DOI: [10.1134/S0018151X14010064](https://doi.org/10.1134/S0018151X14010064)
32. Burtsev S.A., Karpenko A.P., Leontiev A.I. A method for distributed production of liquefied natural gas at gas-distribution stations. *Teplofizika vysokikh temperatur = High Temperature*, 2016, vol. 54, iss. 4, pp. 573–576. DOI: [10.1134/S0018151X16030044](https://doi.org/10.1134/S0018151X16030044)
33. Popovich S.S. Experimental research of machineless energy separation effect influenced by shock waves. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2016, no. 3, pp. 64–80. DOI: [10.7463/0316.0835444](https://doi.org/10.7463/0316.0835444)

34. Wimbrow W.R. Experimental investigation of temperature recovery factors on bodies of revolution at supersonic speeds. *NACA Technical Note 1975*. 1949. 19 p.
35. Tucker M., Maslen S.H. Turbulent boundary-layer temperature recovery factors in two-dimensional supersonic flow. *NACA Technical Note 2296*. Wash., 1951. 21 p.
36. Gruenewald K.H. Temperature recovery factors in the transitional and turbulent boundary layer on a 40-degree cone cylinder at Mach number 2.9 / U.S. Naval Ordnance Laboratory. White Oak (MD), 1953. 64 p.
37. Kutateladze S.S., Leontiev A.I. *Teplomassoobmen i trenie v turbulentnom pogranichnom sloe* [Heat-mass transfer and friction in a turbulent boundary layer]. 2nd ed. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1985. 320 p. (in Russ.).
38. Diaz G., Campo A. Artificial neural networks to correlate in-tube turbulent forced convection of binary gas mixtures. *International Journal of Thermal Sciences*, 2009, vol. 48, Iss. 7, pp. 1392-1397. DOI: [10.1016/j.ijthermalsci.2008.12.001](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.12.001)
39. Kochurov D.S. Investigation of transport and thermophysical properties of binary mixtures of inert gases with the use of Tetra automated system of calculation. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiy vestnik. MGTU im. N.E. Bauman* = *Youth Science and Technology Herald of the Bauman MSTU*, 2014, no. 2. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/708327.html>, accessed 07.07.2015.